

KARAKTERISTIK SAMBUNGAN *FRICTION STIR SPOT WELDING* POLYPROPYLENE DENGAN VARIASI KECEPATAN PUTAR DAN *SHOULDER ANGLE*

Muh Rifa'i Dwi Saputra^a, Aris Widyo Nugroho^b, Cahyo Budiyanoro^c
Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Yogyakarta
Jalan Lingkar Selatan, Tamantirto, Kasihan, Bantul, DI Yogyakarta, Indonesia, 55183
^amrifaidwis@gmail.com, ^bariswidyo@umy.ac.id, ^ccahyo_budi@umy.ac.id

INTISARI

Friction stir spot welding (FSSW) merupakan metode penyambungan sebuah material yang memanfaatkan panas dari gesekan *pin tool* dan *shoulder*. Salah satu material yang digunakan adalah *polypropylene*. *Polypropylene* banyak digunakan di dunia industri karena memiliki kekuatan yang tinggi dan ringan. Bentuk geometri *tool* mempengaruhi hasil dari proses penyambungan material dari sifat mekanik serta struktur makro. Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui pengaruh variasi kecepatan putar dan bentuk geometri *tool* terhadap sifat mekanik dan struktur makro dari material *polypropylene* dengan menggunakan metode FSSW.

Bahan yang digunakan pada penelitian ini adalah lembaran *polypropylene* dengan panjang 150 mm, lebar 30 mm dan tebal 5 mm. Proses penyambungan dilakukan pada variasi kecepatan putar 985, 1660, 2350 rpm. Terdapat 2 tipe *tool* yang digunakan antara lain *tool* dengan *shoulder angle* 5° dan *tool* tanpa *shoulder angle* atau datar parameter lain seperti *tool plunge rate*, *dwell time*, *delay time* yang dianggap konstan. Pada penelitian ini dilakukan 3 pengujian, seperti pengujian tarik, pengujian kekerasan dan pengujian struktur makro.

Hasil dari penelitian menunjukkan bahwa dari penggunaan *tool* dengan *shoulder angle* 5° memiliki nilai kapasitas beban tarik terbaik dengan presentase 95,13 % dari nilai kapasitas beban tarik raw material dengan nilai kapasitas beban tarik yang dihasilkan yaitu 2116,67 N. Penggunaan variasi kecepatan putar 2350 rpm memiliki hasil pada luasan area yang dihasilkan paling optimal. Berdasarkan hasil yang diperoleh diatas bentuk geometri *tool* yang mempunyai *shoulder angle* 5° lebih di rekomendasikan karena memiliki nilai kekuatan dan luasan area yang dihasilkan paling baik di bandingkan variasi lainnya.

Kata kunci: FSSW, Polypropylene, Shoulder angle, Uji tarik, Uji Kekerasan

ABSTRACT

Friction stir spot welding (FSSW) is a method of joining a material that utilizes heat from the friction of the pin tool and shoulder. One of the materials used is polypropylene. Polypropylene is widely used in the industrial world because it has high strength and light weight. The shape of the tool geometry influences the results of the material joining process from mechanical properties and macro structure. This research was conducted to determine the effect of variations in rotational speed and geometric shape of the tool on the mechanical properties and macro structure of polypropylene material using the FSSW method.

The material used in this research is polypropylene sheets with a length of 150 mm, width 30 mm and thickness of 5 mm. The joining process is carried out at variations of rotational speeds of 985, 1660, 2350 rpm. There are 2 types of tools used, including tools with a shoulder angle of 5° and tools without shoulder angle or other flat parameters such as tool plunge rate, dwell time, delay time which are considered constant. In this research 3 tests were conducted, such as tensile testing, hardness testing and macro structure testing.

The results of the research showed that the use of tools with a shoulder angle of 5° had the best value of the tensile load capacity with a percentage of 95.13% of the value of the raw material tensile load capacity with the resulting tensile load capacity of 2116.67 N. The use of rotational speed variations of 2350 rpm has the most optimal results on the area produced. Based on the results obtained above the geometrical shape of the tool that has a shoulder angle of 5° is more recommended because it has the best strength and area produced compared to other variations.

Keywords: FSSW, Polypropylene, Shoulder angle, Tensile test, Hardness test

1. Pendahuluan

Plastik merupakan bahan yang cukup banyak di gunakan pada kehidupan manusia. Pemakaian plastik tidak hanya pada alat sederhana, namun juga digunakan pada alat yang kompleks. Saat ini penggunaan plastik pada dunia industri semakin banyak. Plastik merupakan material yang ringan, kuat dan tahan korosi. Hal ini tidak menutup kemungkinan bahwa penggunaan plastik akan berpeluang besar menggantikan material logam sebagai bahan yang paling banyak digunakan saat ini.

Polypropylene (PP) merupakan salah satu polimer termoplastik yang dibuat oleh industri kimia dan digunakan untuk berbagai aplikasi. *Polypropylene* sering digunakan dalam dunia industri otomotif, konstruksi, penerbangan, dan pertambangan. *Polypropylene* banyak dipilih karena memiliki kekuatan yang tinggi, anti korosi, performa yang baik dengan harga yang relatif murah namun *polypropylene* juga memiliki kekurangan diantaranya kekerasan yang rendah, rentan terhadap abrasi dan memiliki kekuatan impak yang kurang baik (Prasad dan Raghava, 2012). Pengelasan adalah proses penyambungan dua material yang salah satunya dipanaskan sampai cair dan sampai terjadi ikatan metalurgi antara dua material tersebut. Biasanya dilakukan pada material termoplastik. Proses pengelasan plastik dibagi menjadi dua kelompok utama, yaitu: proses yang melibatkan gerakan mekanis yang menghasilkan panas (*ultrasonik welding, friction welding, vibration welding*) dan proses yang melibatkan pemanasan eksternal (*hot plate welding, hot gas welding dan implant welding*) (Arici dan Sinmaz, 2005).

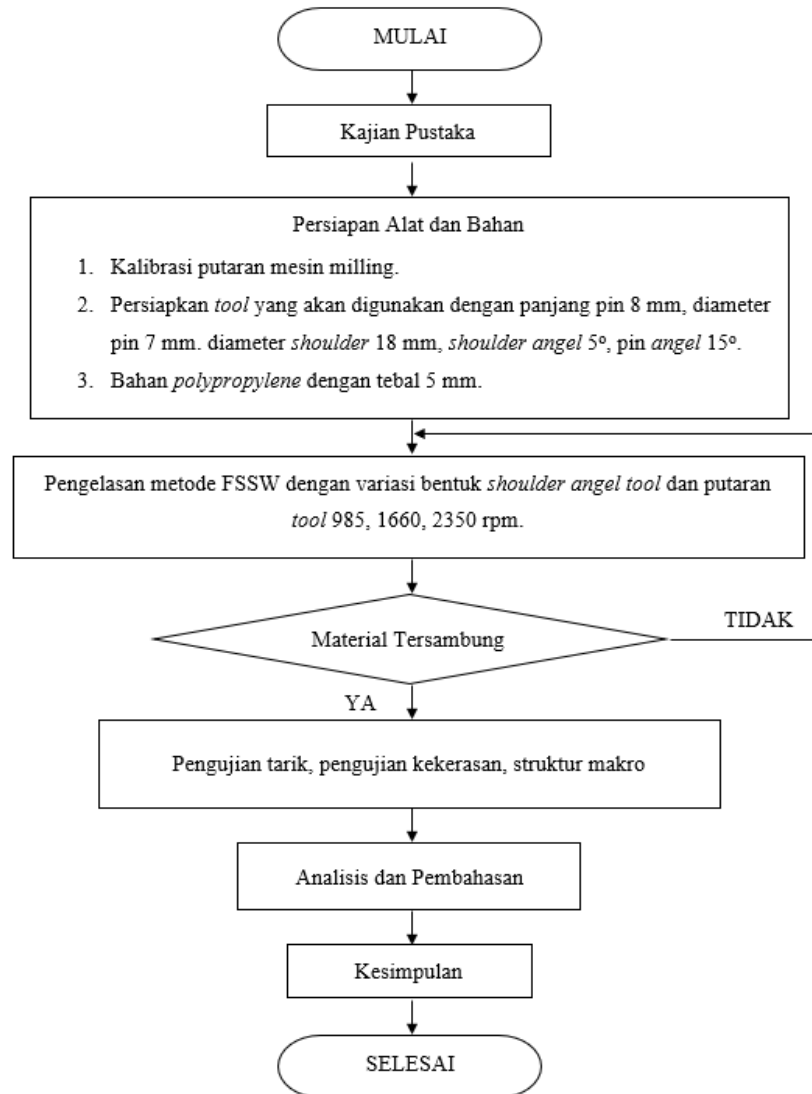
Teknologi pengelasan sekarang ini semakin berkembang. Beberapa teknik pengelasan modern ditemukan salah satu teknik pengelasan yang di kembangkan adalah *Friction Stir Spot Welding* (FSSW). FSSW adalah pengembangan dari *Friction Stir Welding* (FSW) dengan teknik pengelasan titik. Teknik penyambungan FSSW banyak digunakan pada industri otomotif terutama pada penyambungan material berbentuk plat. Prinsip kerja pengelasan FSSW yaitu memanfaatkan panas akibat gesekan yang dihasilkan dari alat yang berputar dan dilengkapi silinder yang menonjol (*pin tool*) dan silinder luar yang berukuran lebih besar dari *pin* (*shoulder*).

Bilici (2012) meneliti tentang pengaruh geometri *tool* pada metode pengelasan FSSW dengan menggunakan material *polypropylene*. Lembaran *polypropylene* mempunyai tebal 4 mm dengan lebar 60 mm dan panjang 150 mm. Parameter konstan seperti kecepatan putar *tool* 900 rpm, *dwell time* 105 detik, *delay time* 50 detik dan *tool plunge rate* 0,33 mm/s. pada saat proses pengelasan setelah mencapai kedalaman yang telah ditentukan maka putaran di hentikan dan menunggu selama 50 detik sebelum *tool* di diangkat. Setelah itu dilakukan proses pengujian dengan menggunakan mesin insitron dengan *cross head* konstan yaitu sebesar 5 mm/s. Dari hasil tes yang dilakukan setiap *tool* memiliki diameter *pin* 7,5 mm, *shoulder angle* 6° dan diameter *shoulder* 30 mm. untuk *pin* silinder meruncing mempunyai *pin angle* 15°. beban maksimum *fracture load* diperoleh dengan menggunakan *pin* silinder meruncing dengan nilai 4032 N. untuk profil *pin* silinder lurus memiliki beban *fracture load* terendah dengan nilai 3305 N. Hasil penelitian diatas dapat disimpulkan bahwa bentuk profil *pin tool* sangat pengaruh terhadap hasil kekuatan lasan pada metode FSSW. Bentuk profil *pin tool* silinder meruncing mempunyai nilai kekuatan terbaik.

Penelitian FSSW dengan menggunakan parameter putaran *tool* dan bentuk geometri *tool* terutama pada *pin tool* sudah banyak dilakukan. Penelitian ini akan membahas mengenai karakteristik sambungan *friction stir spot welding* untuk material *polypropylene* dengan variasi kecepatan putar dan *shoulder angle*. Variasi kecepatan putar yang digunakan yaitu 985, 1660, dan 2350 rpm. Terdapat 2 tipe *tool* yang akan digunakan pada penelitian ini, bentuk geometri *tool* 1 dan *tool* 2 memiliki persamaan antara lain bentuk *pin tool*, diameter *pin tool*, panjang *pin tool*, dan diameter *shoulder*. Yang membedakan antara kedua tipe *tool* yang digunakan yaitu pada *shoulder angle* yang terdapat pada *tool* 2 dengan sudut 5°. Untuk pengujian yang dilakukan pada pengelasan dengan metode FSSW yaitu uji struktur makro, uji tarik, dan uji kekerasan. Hal ini bertujuan memberikan informasi baru tentang pengaruh parameter bentuk *shoulder angle* terhadap nilai kekuatan tarik, kekerasan dan struktur makro.

2. Metode Penelitian

Langkah - langkah utama dalam proses pengelasan dengan metode FSSW dapat dilihat pada gambar 1 dibawah ini.



Gambar 1 Diagram alir penelitian

Mesin milling merupakan alat utama yang digunakan pada penelitian kali ini. Perinsip kerja mesin milling yaitu mengubah energi listrik menjadi putaran yang dapat diatur kecepatan putarnya dengan menggunakan variasi ukuran pulley yang tersedia. Pada penelitian ini menggunakan tipe mesin milling FM-2SK Chevalier Vertikal.

Mesin milling berperan penting dalam proses pengelasan FSSW ini dikarenakan mesin milling alat yang berfungsi untuk memutar *tool* yang akan mengalami gesekan langsung dengan spesimen. Spindel pada mesin milling ini berguna untuk mencekam dan memutar *tool* yang akan menghasilkan putaran. Putaran pada *tool* ini selanjutnya ditekan pada material yang telah dicekam dan akan menghasilkan panas yang berfungsi untuk melunakkan material dan terjadilah proses penyambungan. Gambar 2 merupakan mesin milling yang digunakan untuk proses pengelasan FSSW.



Gambar 2 Mesin *milling*

Pada penelitian ini material yang digunakan yaitu *polypropylene* dengan ukuran 150mm x 30 mm x 5 mm yang ditunjukkan pada gambar 3 dibawah ini.



Gambar 3 Lembaran *polypropylene*

2.1 Pengujian Makro

Pengujian struktur makro adalah peroses pengamatan permukaan pada suatu material yang memiliki struktur kristal yang tergolong kasar dan besar dengan menggunakan mikroskop. Umumnya pada pengujian struktur makro memiliki angka kevalidan antara 0,5 sampai 50 kali. Pengujian ini berfungsi untuk menunjukkan daerah seperti panjang *nugget*, *heat effected zone*, *weld bonded area* dan juga cacat pada hasil pengelasan. Pengujian foto makro ini menggunakan alat optik usb bermerek Olympus yang hasil gambarnya tersambung langsung dengan unit komputer.

2.2 Pengujian Tarik

Pengujian tarik dilakukan guna mengetahui nilai kekuatan tarik dari suatu material dan dapat digunakan untuk memperkirakan karakteristik dari sebuah material yang digunakan. Sehingga ketika melakukan perencanaan dapat memilih jenis material yang digunakan sesuai kebutuhan. Pelaksanaan pengujian material *polypropylene* dilakukan dengan cara menjepit kedua ujung spesimen dengan kecepatan tarik yang telah ditentukan sampai dengan material tersebut mengalami patahan hingga putus. Standar pengujian untuk material polypropylene yaitu EN 12814-2. Kecepatan uji tarik menggunakan alat Zwick/Roel Z020 dan kecepatan uji tarik yang digunakan yaitu 20 mm/menit.

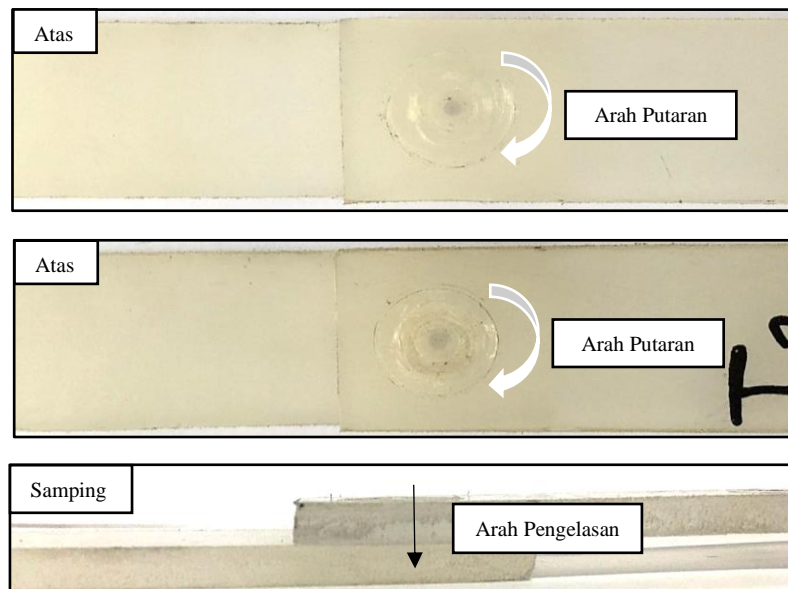
2.3 Pengujian Kekerasan

Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui besar nilai kekerasan atau sifat mekanik sambungan menggunakan metode FSSW pada material *polypropylene*. Satuan yang dipakai untuk pengujian kekerasan yaitu *Shore D* karena pada jenis pengujian kekerasan nilai empiris atau perbandingan yang berkisar 0 – 100 *Shore D*.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Hasil Pengelasan

Hasil pengelasan dengan metode FSSW menggunakan parameter pengaruh kecepatan putar dan *shoulder angle*. Dibawah ini merupakan hasil pengelasan yang terdapat pada parameter *tool 1* dan *tool 2*.



Gambar 4 Hasil pengelasan dengan metode FSSW menggunakan *tool 1* dan *tool 2*

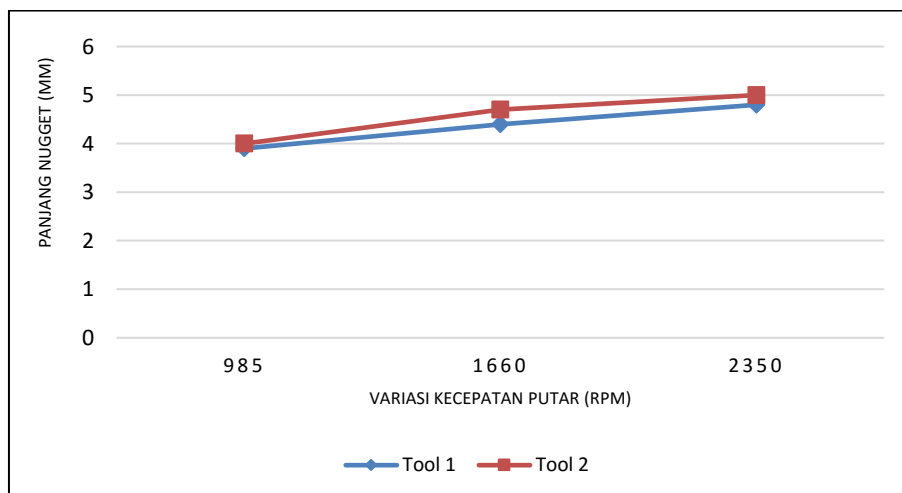
Hasil penelitian dapat dilihat pada gambar 4 *tool 1* dan *tool 2* memiliki hasil yang tidak terlalu jauh berbeda dari segi visual. Namun jika dilihat lebih dekat perbedaan yang paling terlihat itu antara hasil pengelasan yang menggunakan *tool 1* dengan hasil pengelasan yang menggunakan *tool 2* yaitu hasil pengelasan yang menggunakan *tool 2* seperti mempunyai tonjolan pada bagian permukaan yang kontak langsung dengan *shoulder* itu dikarenakan pada *tool 2* mempunyai *shoulder angle* 5° berbeda dengan *tool 1* permukaan *shoulder* yang dimiliki rata atau datar.

3.2 Hasil Foto Makro

Hasil dari pengujian struktur makro dari hasil pengelasan dengan menggunakan metode *friction stir spot welding* pada material *polypropylene* dengan variasi kecepatan putar dan bentuk *shoulder angle*. Gambar 5 dapat dilihat pada grafik kenaikan variasi kecepatan putar yang digunakan mempengaruhi panjang *nugget* yang dihasilkan begitu juga dengan variasi bentuk *tool* yang digunakan, *tool* yang mempunyai *shoulder angle* terdapat pada *tool 2* memiliki panjang *nugget* paling tinggi dari pada *tool 1* yang tidak mempunyai *shoulder angle*. Pada table 1 dapat dilihat yang mana pada gambar (A) menunjukkan panjang *nugget* dan area lasan yang dihasilkan. Pada gambar (B) menunjukkan adanya cacat yang terjadi pada area lasan adapun hasilnya dapat dilihat sebagai berikut:

Tabel 1 Hasil foto makro dari pengelasan dengan metode FSSW

Variasi	Gambar A	Gambar B
Tool 1 985 rpm		
Tool 2 985 rpm		
Tool 1 1660 rpm		
Tool 2 1660 rpm		
Tool 1 2350 rpm		
Tool 2 2350 rpm		



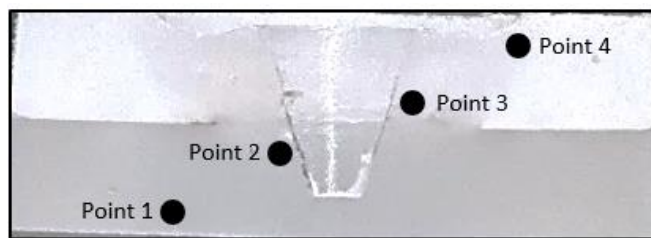
Gambar 5 Grafik Panjang Nugget

3.3 Hasil Uji Kekerasan

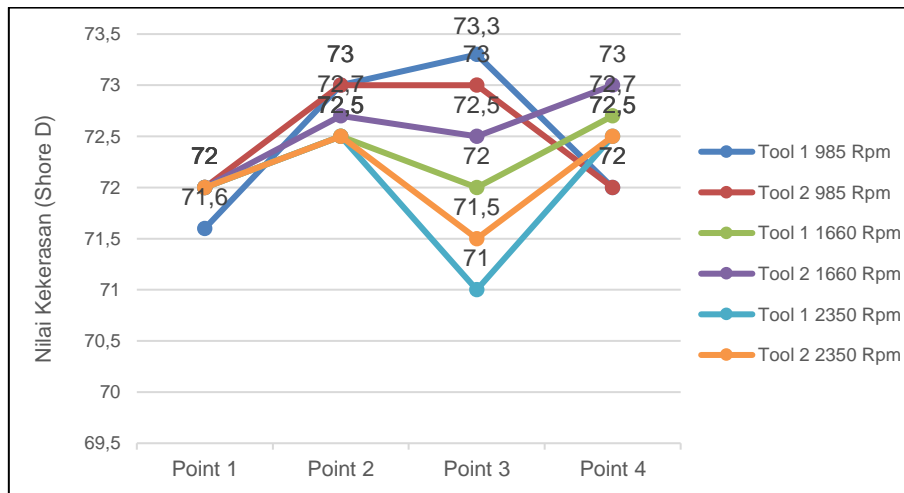
Hasil pengujian kekerasan pada penelitian ini dilakukan pada 6 spesimen. Setiap spesimen memiliki parameter yang berbeda yaitu *tool 1 / 985 rpm*, *tool 2 / 985 rpm*, *tool 1 / 1660 rpm*, *tool 2 / 1660 rpm*, *tool 1 / 2350 rpm*, dan *tool 2 / 2350 rpm*. Titik pengujian diambil dari 4 titik, yaitu : point 1, point 2, point 3, dan point 4. Pada tabel 2 menunjukkan hasil nilai kekerasan dengan menggunakan alat durometer.

Tabel 2 Hasil pengujian kekerasan

Variasi	Tool 1 985 rpm	Tool 2 985 rpm	Tool 1 1660 rpm	Tool 2 1660 rpm	Tool 1 2350 rpm	Tool 2 2350 rpm
Point 1	71,6	72	72	72	72	72
Point 2	73	73	72,5	72,7	72,5	72,5
Point 3	73,3	73	72	72,5	71	71,5
Point 4	72	72	72,7	73	72,5	72,5



Gambar 6 Titik lokasi pengujian kekerasan

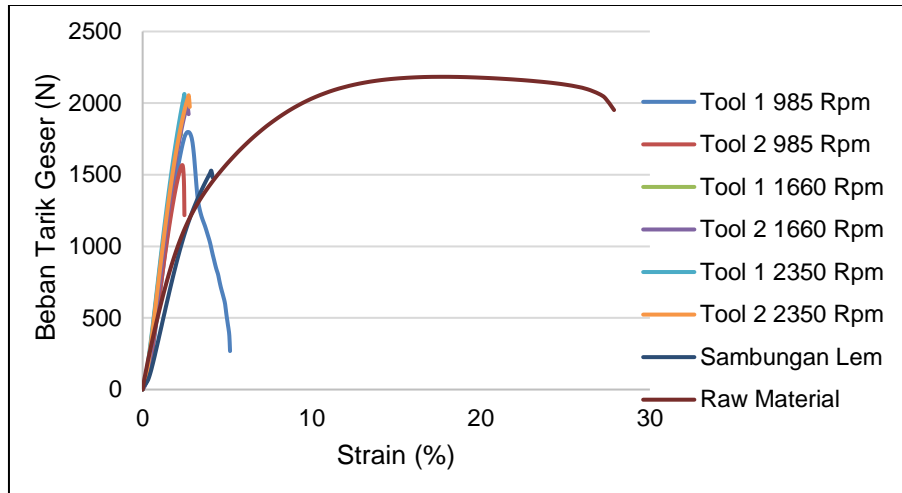


Gambar 7 Grafik hasil uji kekerasan pengelasan FSSW

Gambar 7 merupakan grafik hasil pengujian kekerasan pada metode pengelasan FSSW. Dari grafik diatas dapat dilihat nilai kekerasan yang paling baik terdapat pada spesimen yang menggunakan parameter *tool 2 / 985 rpm*. hal ini dilihat dari nilai yang terdapat pada point 2 dan point 3 yang mana menghasilkan nilai kekerasan yang sama yaitu 73 Shore D. Point 2 dan point 3 merupakan titik dimana lembaran material *polypropylene* bagian bawah dan bagian atas tersambung akibat proses pengelasan dengan metode FSSW. Hal ini dapat terjadi karean putaran yang digunakan terlalu tinggi sehingga material mengalami perubahan struktur yang mengakibatkan nilai kekerasannya menurun. Pada point 3 itu merupakan lembaran material menerima panas yang lebih besar dibandingkan pada point 2 karena posisi lembaran material berada diatas dan merupakan bagian yang mengalami kontak langsung dengan tool yang digunakan.

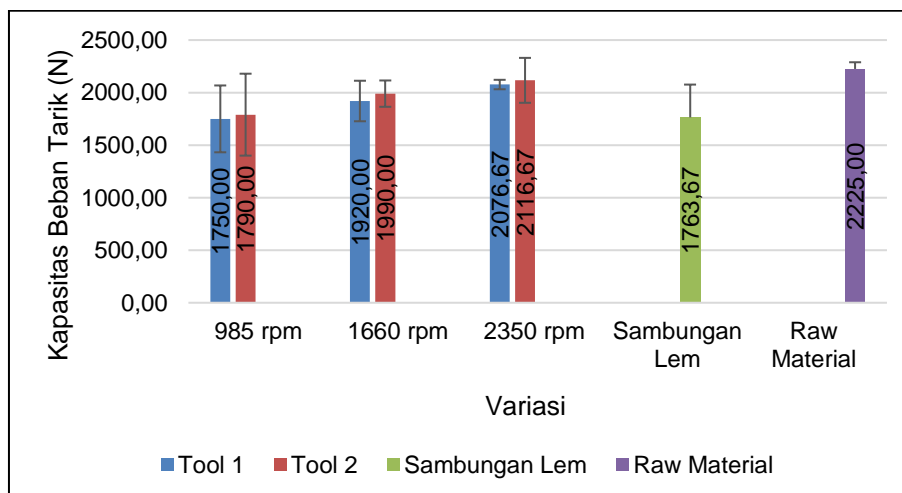
3.4 Hasil Uji Tarik

Penelitian ini melakukan pengujian tarik sesuai dengan standar EN 12814-2, dikarenakan jenis material yang digunakan adalah polimer dan menggunakan tipe sambungan *lap joint*.



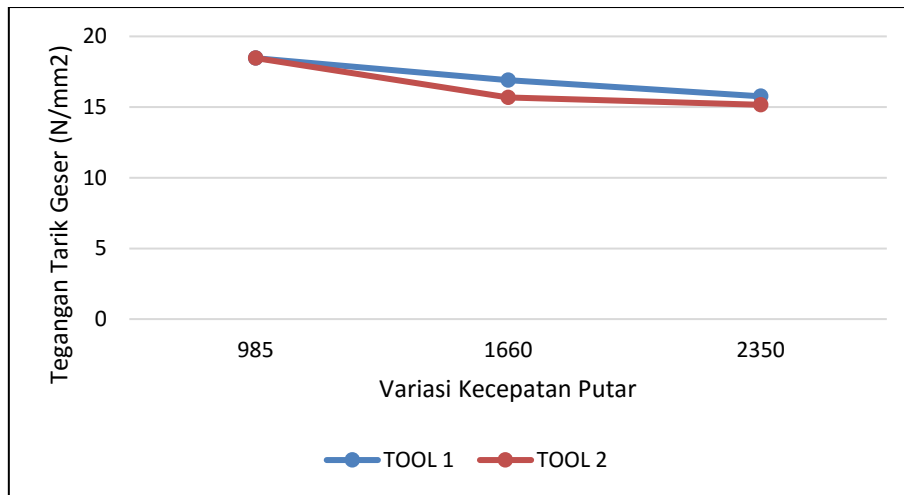
Gambar 7 Kurva beban tarik geser dan regangan

Gambar 5 dapat dilihat bahwa kurva beban tarik geser dan kurva regangan yang sudah mencakup nilai dari sambungan lem dan raw material. Dapat dilihat pada grafik hasil pengujian tarik ini bahwa pada spesimen raw material, *tool 1 / 985 rpm*, dan *tool 2 / 985 rpm* terjadi proses *necking* sebelum mengalami patah. Hal ini menunjukkan bahwa material ini memiliki sifat ulet dan area lasan yang dihasilkan dari variasi *tool 1 / 985 rpm*, dan *tool 2 / 985 rpm* memiliki kesamaan sifat dengan raw material. Hasil pengujian tarik dengan parameter *tool 2 / 2350 rpm* mempunyai nilai beban tarik geser yang paling tinggi ini menunjukkan bahwa parameter tersebut mempunyai hasil yang hampir mendekati nilai beban tarik geser dari raw material dengan presentase 94,95 %. Pada table 1 panjang *nugget* yang dihasilkan dari proses pengelasan dengan parameter *tool 2 / 2350 rpm* yaitu 5,0 mm sehingga membuat luasan area yang dihasilkan semakin besar hal tersebut yang membuat nilai beban tarik gesernya tinggi. Sedangkan hasil pengujian tarik yang memiliki nilai beban tarik geser terendah dihasilkan oleh parameter *tool 2 / 985 rpm* hasil tersebut lebih cenderung mendekati dari nilai beban tarik geser yang dihasilkan dari sambungan lem.



Gambar 8 Grafik nilai rata – rata kapasitas beban tarik pada pengelasan FSSW

Gambar 8 dapat dilihat dari grafik bahwa nilai rata - rata kapasitas beban tarik yang dihasilkan dari setiap parameter berbeda - beda. Nilai kapasitas beban tarik tertinggi didapat pada parameter *tool 2* / 2350 rpm yaitu dengan nilai 2116,67 N ini menunjukkan bahwa parameter tersebut hampir mendekati nilai rata - rata kapasitas beban tarik yang dihasilkan dari raw material dengan presentase 95,13%. Nilai kuat tarik dari raw material itu sendiri yaitu 2225,00 N. Hal ini bisa terjadi karena putaran mesin yang di gunakan cukup tinggi sehingga dapat menghasilkan panas lebih optimal sehingga membuat area lasan yang dihasilkan menjadi besar. Dapat dilihat juga dari hasil foto makro pada table 1 panjang *nugget* yang dihasilkan oleh parameter *tool 2* / 2350 rpm memiliki panjang 5,0 mm. Sedangkan untuk nilai rata - rata kapasitas beban tarik terendah didapatkan dari parameter *tool 1* / 985 rpm dengan nilai 1750,00 N, hal ini disebabkan karena putaran mesin terlalu rendah sehingga panas yang dihasilkan kurang optimal, panjang *nugget* yang dihasilkan dari parameter ini yaitu 3,9 mm dapat dilihat pada tabel 1. Hal ini menyebabkan luasan area lasan yang dihasilkan tidak terlalu besar. Sehingga membuat nilai kapasitas beban tariknya rendah.



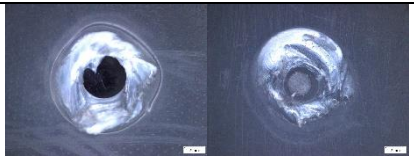
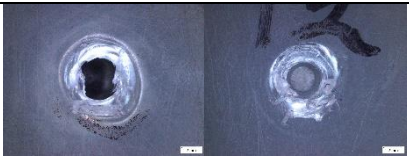




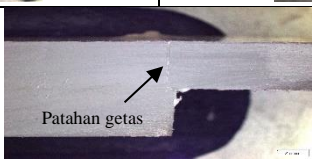

Gambar 8 Grafik nilai Tegangan tarik Geser Tool 1 dan Tool 2

Gambar 8 menunjukkan nilai tegangan tarik geser yang dihasilkan dari *tool 1* dan *tool 2*. Dari grafik diatas menunjukkan nilai tegangan tarik geser pada *tool 1* lebih tinggi dari pada nilai tegangan tarik geser dari *tool 2*. Sementara untuk pengaruh variasi kecepatan putar yang digunakan semakin tinggi kecepatan putar menghasilkan nilai tegangan tarik yang semakin rendah. Nilai tegangan tarik paling tinggi diperoleh dari parameter *tool 2* dengan menggunakan variasi putaran 985 rpm dengan nilai 18,47 N/mm² sedangkan untuk nilai tegangan tarik paling terendah diperoleh dari parameter *tool 2* dengan menggunakan variasi putaran 2350 rpm dengan nilai 15,16 N/mm².

3.5 Fraktografi

Mode kegagalan yang terjadi pada *tool 1* dan *tool 2* dengan variasi putaran 985 rpm yaitu *side pullout*, dimana kegagalan ini berbentuk sobekan yang terjadi pada daerah lasan. Untuk mode kegagalan yang terjadi pada *tool 1* dan *tool 2* dengan variasi putaran 1660 dan 2350 rpm yaitu *one side partial*, dimana hanya satu sisi yang mengalami patahan pada daerah lasan. Sambungan lem mengalami patah getas pada salah satu bagian sisi materialnya sedangkan untuk raw material sebelum mengalami patah terjadi proses penyusutan atau *necking* pada bagian tengah spesimen dapat dilihat pada table 3.

Tabel 3 Mode kegagalan

Variasi	Tool 1	Tool 2
985 rpm		
1660 rpm		
2350 rpm		
Sambungan Lem		
Raw Material		

3.5 Kesimpulan

Penelitian mengenai karakteristik sambungan *friction stir spot welding* untuk material *polypropylene* dengan variasi kecepatan putar dan shoulder angle dan mengkaji hasil penelitian berdasarkan dari hasil pengujian tarik, pengujian kekerasan dan pengujian struktur makro maka dapat disimpulkan bahwa hasil pengelasan yang paling optimal didapat dari parameter tool 2 / 2350 rpm dengan hasil 95,13% dari nilai kekuatan raw material.

1. Pada hasil pengujian foto makro dapat di ketahui bahwa semakin tinggi variasi kecepatan putaran yang di gunakan makan akan menghasilkan panjang *nugget* yang semakin baik. Panjang *nugget* yang paling baik diperoleh dari variasi kecepatan putar 2350 rpm dengan hasil 5,0 mm. Dapat dilihat juga perbedaan antara *tool 1* dan *tool 2* dimana pada *tool 2* dapat menghasilkan panjang *nugget* yang lebih tinggi dibanding *tool 1* pada tiap variasi kecepatan putar yang digunakan. untuk cacat yang terjadi pada tiap variasi kecepatan putar rata - rata berupa cacat rongga.
2. Pada hasil pengujian kekerasan dapat diketahui nilai kekerasan yang paling tinggi diperoleh dari parameter *tool 2* yang mempunyai shoulder angle 5° pada variasi kecepatan putar 985 rpm dengan nilai yang terdapat pada point 2 dan point 3 yang mana menghasilkan nilai kekerasan yang sama yaitu 73 Shore D.
3. Pada hasil pengujian tarik menunjukkan kapasitas beban tarik tertinggi diperoleh dari parameter *tool 2* dengan variasi putar 2350 rpm dengan nilai 2116,67 N. Terlihat juga dari hasil uji tarik bahwa pengaruh dari penggunaan *tool 1* yang tidak mempunyai *shoulder angle* dan *tool 2* yang mempunyai *shoulder angle* dengan sudut 5° dimana hasil pengujian menunjukkan nilai kapasitas beban tarik mengalami peningkatan pada setiap variasi kecepatan putar yang di gunakan.

3.6 Daftar Pustaka

- Arici, A. a., & Sinmaz, T. (2005). Effects of Double Passes of the Tool on Friction Stir Welding. *Journal of Material Science*, 3313 – 3316.
- Bilici, M. (2012). Effect of Tool Geometry on Friction Stir Spot Welding of Polypropylene Sheets. *Materials and Design*, 6, 805–813.
- Bilici, M. K., & Yüklér, A. I. (2012). Influence of Tool Geometry and Process Parameters on Macrostructure and Static Strength in Friction Stir Spot Welded Polyethylene Sheets. *Materials and Design*, 33, 145–152.
- Bilici, M., & Yukler, A. (2012). Effects of Welding Parameters on Friction Stir Spot Welding of High Density Polyethylene Sheets. *Materials and Design*, 33, 545–550.
- Prasad, R. V., & Raghava, P. M. (2012). Fsw of Polypropylene Reinforced With Al₂O₃ Nano Composites, Effect on Mechanical and Microstructural Properties. *Engineering Research and Applications*, 2(6), 288-296.